

## イタリアにおける歴史的な組積造建築と RC 建築 — ヴィコフォルテ教会堂と飛行船格納庫 —

青木 孝義

### 1 はじめに

イタリアにおける歴史的な組積造建築は何かと問われれば、ローマのパンテオン（ドームの平面形状：円形、2世紀建設）、サン・ピエトロ聖堂（ドームの平面形状：円形、16世紀建設）、フィレンツェのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂（ドームの平面形状：八角形、15世紀建設）など、観光地にある宗教建築を挙げる人が多いだろう。日本では殆ど知られていないが、イタリア北西部ピエモンテ州モンドヴィ市近郊のヴィコフォルテ教会堂（ドームの平面形状：楕円形、18世紀建設、写真1）は、1880年に国宝に指定された時代・都市・様式・文化を代表する重要建築物のひとつであり、世界最大規模の組積造楕円形ドームを持つ優れた空間構造物である。

一方、シチリアのアウグスタにある飛行船格納庫（1917年建設開始、写真4）も、1987年に国宝に指定され、ヨーロッパで、いや恐らく世界中で現存する鉄筋コンクリートで作られた唯一の例であるが、日本では殆ど知られていない。イタリアには、この他にも歴史的な組積造建築や RC 建築が数多く残っている。

ヴィコフォルテ教会堂は、建設当初から不同沈下やドームの自重による進行中の亀裂により、ドームの崩壊に関する構造的安定性が脅かされてきた。ドームの構造的安定性については注目を集め、1962年には Garro<sup>1)</sup> による、1983年には Rodio<sup>2)</sup> による調査報告がなされ、1987年にはドラムに補強リングが挿入されたが、導入張力については未だに確定しておらず、保存や補強の面から構造特性の解明が切望されている。一方、RC 飛行船格納庫は、鉄製の大扉の重量による不同沈下などの影響で、屋根スラブと壁面には大きな亀裂が生じ、その構造的安定性が危惧されている。1989年には大扉の倒れ防止のためのワイヤとアンカーが設置され、1994年には右側バットレスを補修、1996年から各種調査が開始され、保存に向けて補強工事を実施することが2006年に決定している。

本稿は、イタリアにおける歴史的な組積造建築であるヴィコフォルテ教会堂と RC 建築である飛行船格納庫の建設経緯、修復工事の歴史を整理するとともに、三次元レーザースキャニング調査の概要を報告するものである。

## 2 ヴィコフォルテ教会堂

### 2. 1 ヴィコフォルテ教会堂の現状

イタリア北西部ピエモンテ州モンドヴィ市近郊のヴィコフォルテに位置するヴィコフォルテ教会堂(1596年建設開始、1731年ドーム建設、1733年ランタン完成、写真1、図1から図6)は、長軸約37.15m、短軸約24.80m、ドームの高さ約16.60mの世界最大規模の組積造楕円形ドームを持ち、地上からランタン上部までの高さは約84mに及ぶ。教会堂は、楕円形の集中形式プランで北側に祭壇室を備え、後に建設さ



(a) 南面（正面）



(b) ドーム



(c) 西面



(d) 内部



(e) 北面



(f) 東面

写真1 ヴィコフォルテ教会堂



(g) 西面のひび割れ状況



(h) ドーム屋根裏

写真1 ヴィコフォルテ教会堂



(a) 外観 (扉)



(b) 補強リング



(c) ジャッキ

写真2 ドラムに設置された補強リング



(a) 地上レベル



(b) 第2 コーニスレベル

写真3 三次元レーザースキャニング状況



れた4本の鐘楼で構成されている。教会堂のドラム部分は組積造が露出しているが、下部外壁は石貼り、鐘楼は構造体が煉瓦で表面はモルタル仕上げとなっている。ドームの規模は勿論、その建設の歴史や時代背景、建築的特徴から教会堂は1880年にイタリアの国宝に指定され、現在は多くの人々が訪れる信仰や観光の場となっている。

しかし、その崩壊に関する構造的安定性は、1600年代の建設中止、1700年代初めのドラム再建に見られるように、建設当初から敷地選択の誤りによる不同沈下（図17、図18）やドームの自重による亀裂（写真1（g）、図19、図20）の進行により脅かされてきた。ドームの構造的安定性については注目を集め、1962年には Garro<sup>1)</sup> による、1983年には Rodio<sup>2)</sup> による調査報告が、またいくつかの研究発表もなされている<sup>3)、4)</sup>。1983年には地下水位の制御を目的とする水路構が設置され、1987年にはドラムに補強リング（写真2、図7、図16）が挿入され、フレスコ画の修復が行われている。

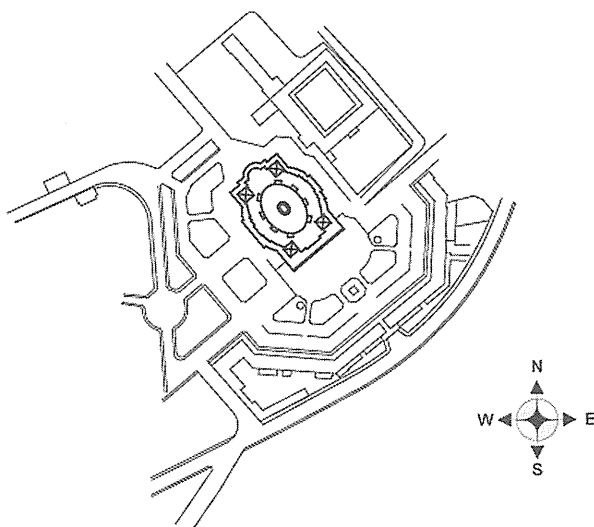


図1 配置図（文献5）に加筆

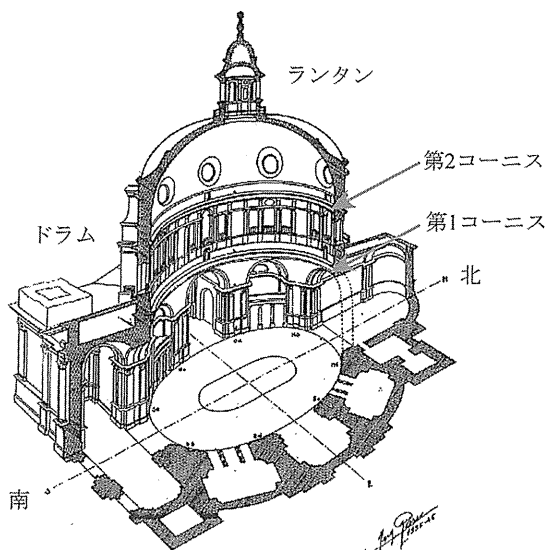


図2 ヴィコフォルテ教会堂の構造概略（文献1）に加筆

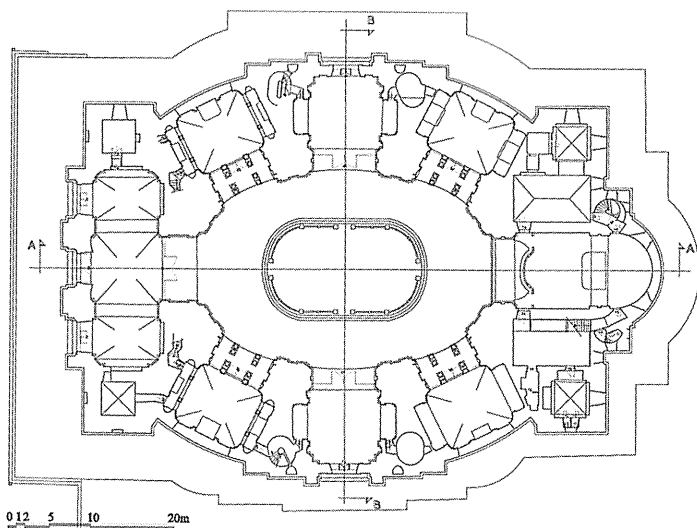
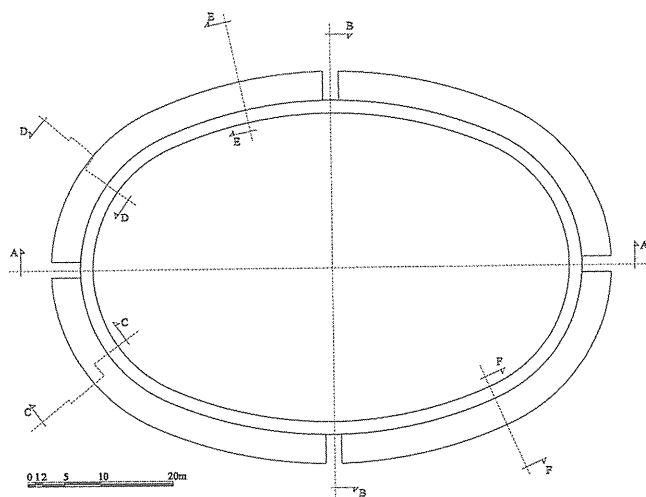
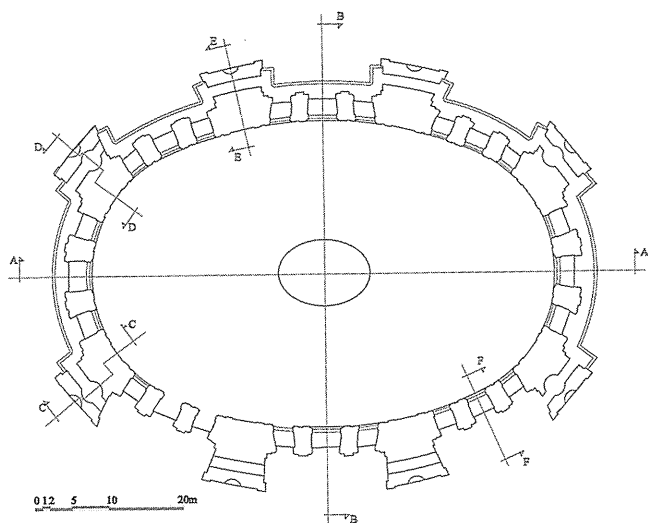


図3 ヴィコフォルテ教会堂平面図（床レベル）<sup>5)</sup>

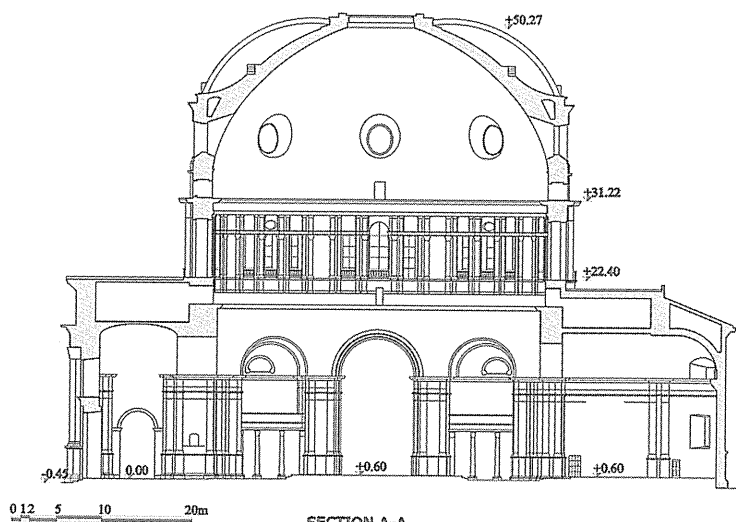


(a) 第2 コーニスレベル



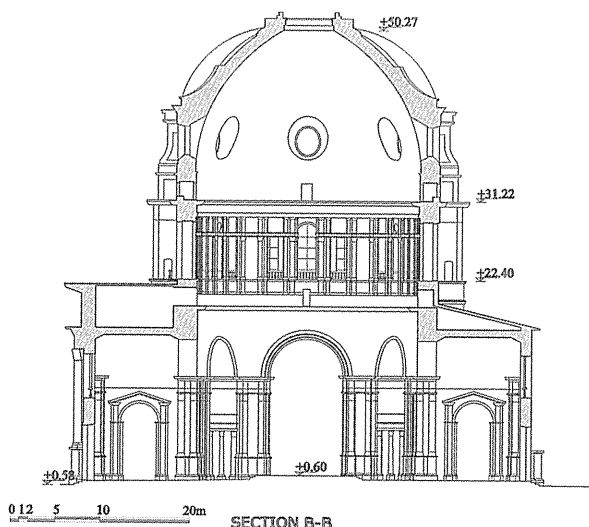
(b) 第1 コーニスレベル

図4 ヴィコフォルテ教会堂平面図<sup>5)</sup>



SECTION A-A

(a) A-A 断面 (長軸)



SECTION B-B

(b) B-B 断面 (短軸)

図5 ヴィコフォルテ教会堂断面図<sup>5)</sup>



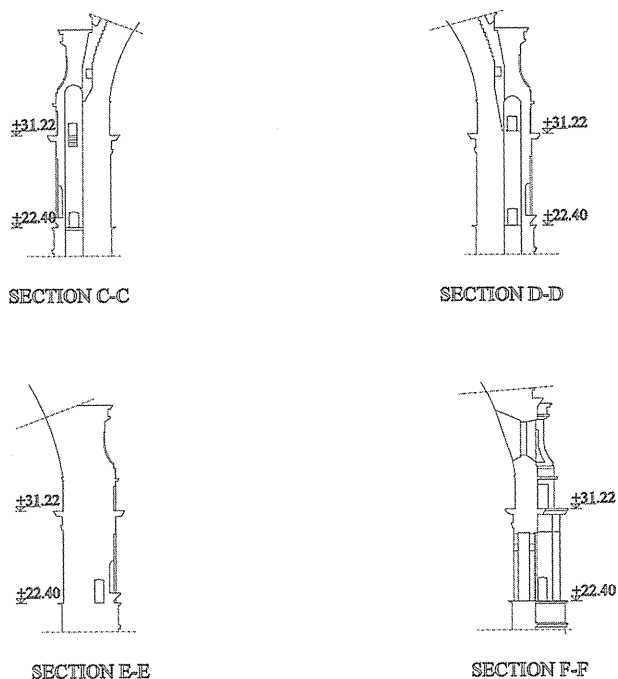
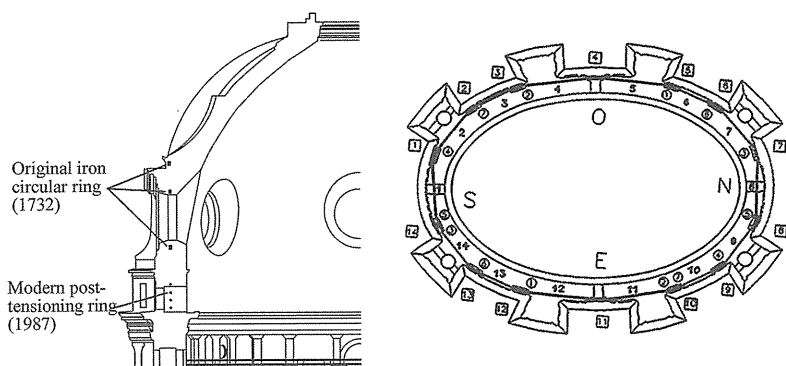


図6 ヴィコフォルテ教会堂断面図（ドラム）<sup>5)</sup>



(a) リング位置

(b) 補強リング配置図

図7 Gallo によるリング (1732) と補強リング (1987)

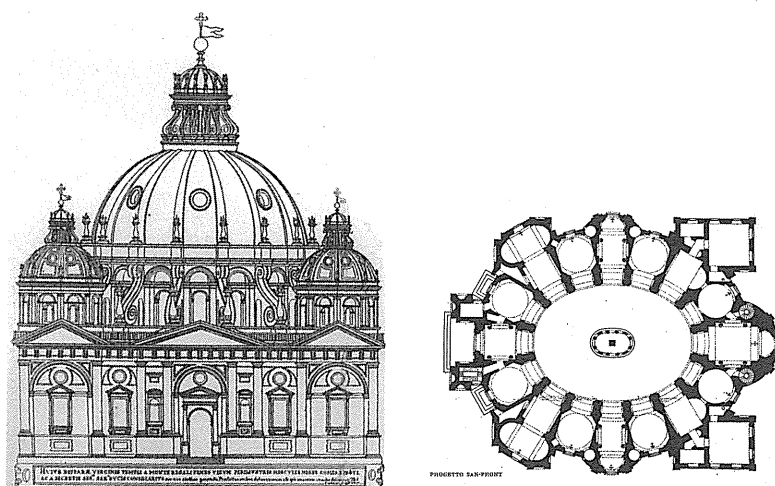
## 2. 2 ヴィコフォルテ教会堂の建設経緯<sup>6)-13)</sup>

### 1) Ascanio Vittozzi による工事

1596年7月7日 Ascanio Vittozzi により教会堂の建設開始

サヴォイア王家の霊廟を建設することを望んだ公爵 Carlo Emanuele I 世の決意により、教会堂の建設が始まった<sup>6)</sup>。設計競技の結果、図8に示す Ercole Negri Conte di Sanfront の案が採用された。その計画とは、ローマのパンテオンなどの主要な教会堂を模倣したもので、サヴォイア王家の墓を安置するための8つの礼拝室が放射状に配された、楕円形の広々とした空間を有する教会堂であった。

Sanfront の計画を見直し、具体的に実行したのは、建築家 Ascanio Vittozzi であった。Vittozzi の原案は、ルネッサンス様式から着想を得ており、半球形の輪郭が見えるドームと隅部に4つの鐘楼を持つ教会堂を想定していた(図9)<sup>8)</sup>。これを見ると、現在の教会堂と



(a) 立面図

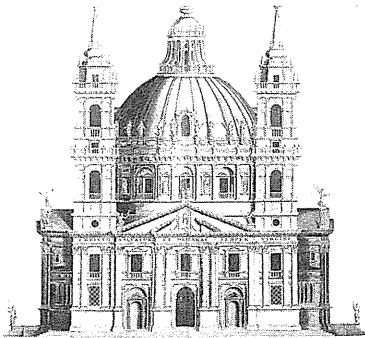
(b) 平面図

図8 Ercole Negri di Sanfront によるヴィコフォルテ教会堂の設計図<sup>7)</sup>

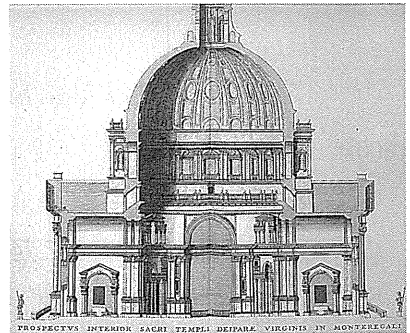
平面図が一致している一方で、立面図はこのドームの大きさでは実現不可能と思われる外弧の形であり、しかも控え壁がないことが分かる。この場所には、地元の信者達の要望により既に1594年、縦55m、横22m のラテン十字形の教会堂の建設が開始されていた（図10）。

1597－1599年 柱壁の建設

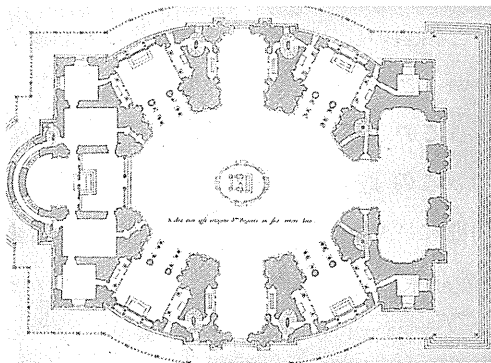
1599年 教会堂内外の石張り工事



(a) 立面図



(b) 断面図



(c) 平面図

図9 Ascanio Vittozzi によるヴィコフォルテ教会堂の設計図<sup>8)</sup>

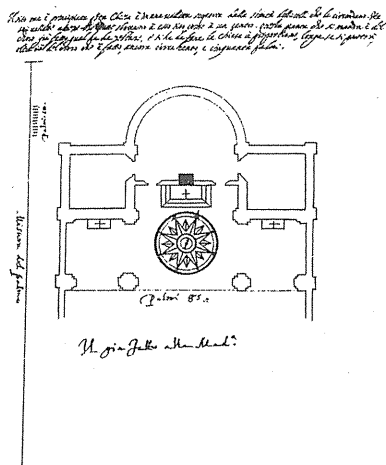


図10 Il già fatto alla Madonna <sup>7)</sup>

## 1600年 最初の地盤沈下

工事が開始されると、基礎地盤が不均質であり、このことが建物の安定性に一連の問題を引き起こすことが明らかになった。図11と図12に Rodio<sup>2)</sup> による教会堂の地盤の概要を示したように、基礎地盤は南西方向の品質の悪い泥灰土層の上に粘土層があるという不安定な地層であった。この地盤に水が侵入した場合、軟弱になり、硬化するまでに、相当の圧力と時間がかかることになる。粘土層の厚みが一定でないことが、基礎の不同沈下をもたらし、組積造の弱体化の原因となっている。

Vacchetta は、このような工事が行われた原因として、北東煉瓦柱の基礎工事期間に、Vittozzi が不在であったためであると指摘している<sup>6)</sup>。当時の北東の粘土層の厚みは3.5m しかなかったことから、聖職者会議のメンバーは、その点を問題視しなかった。よって、Vittozzi が不在の間に、それ以外の7本の柱も、3.5m よりも分厚くばらばらの厚みを持つ粘土層の上に建てられてしまった。その当時



は堅くみえたため、基礎をここに作ることが建物に重大な問題を引き起こすことになるとは全く予想されていなかった。

Garro によれば、既に1599年には25~30cm の沈下が生じたため、Vittozzi は、約10m の高さの所で建設を中止し、基礎にしみ込んだ水を排水するためのダクトを同時に作ったとしている<sup>1)</sup>。

## 1615年 A. Vittozzi の死

現場監督の指揮の下で、細心の注意を払って、1600年代の間中、建設工事は続けられた。1632年、シトー派修道会の修道院長 Malabaila は、当初計画された教会堂の完成に関する資金面の不安から、司教に、もっと質素な形の教会にすることを提案している。その後も建設工事は細々と続けられたが、1701年には、ドラムの第1コーニスの高さ、地上約19m までしか完成していなかった(図13)。

## 2) Francesco Gallo による工事

### 1701年 Francesco Gallo に大聖堂の完成の任務が下りる

モンドヴィ人の建築家 Francesco Gallo が、教会堂の建設工事の任務に就き、損傷しバランスの崩れたドラム、および亀裂のある古い内側のコーニスを取り壊し、Vittozzi の案を参考に建設を再開した。

### 1701-05年 第1コーニス、ドラム基部から大窓までの再建

### 1710年 8組の3連窓が完成

### 1710-11年 第2コーニスまでドラムが完成(図14)

1714年、サヴォイア家の Vittorio Amedeo II 世が、サヴォイア家の霊廟を Superga に建設することを決め、ヴィコフォルテ教会堂は教会の機能だけを有することとなった。つまり1世紀以上経っても、ヴィコフォルテには霊廟はできなかった。このことが、ヴィコフォルテ教会堂の建設のための資金の大幅な縮小と、さらに建設工事の

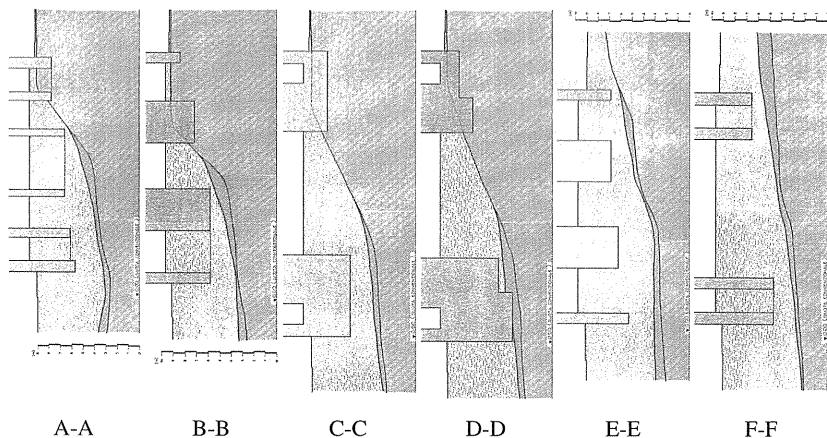
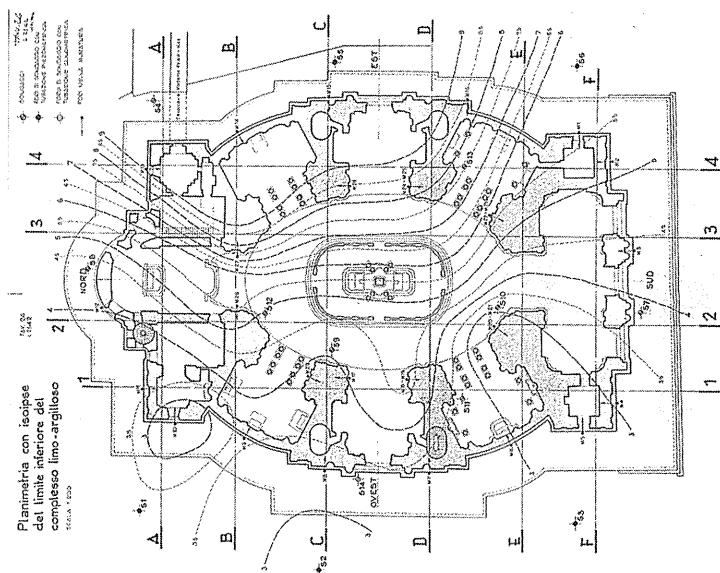


図11 泥灰土層の等高線と基礎の様子<sup>2)</sup>

速度を遅くすることとなった。

1722年 足場のための準備に着手

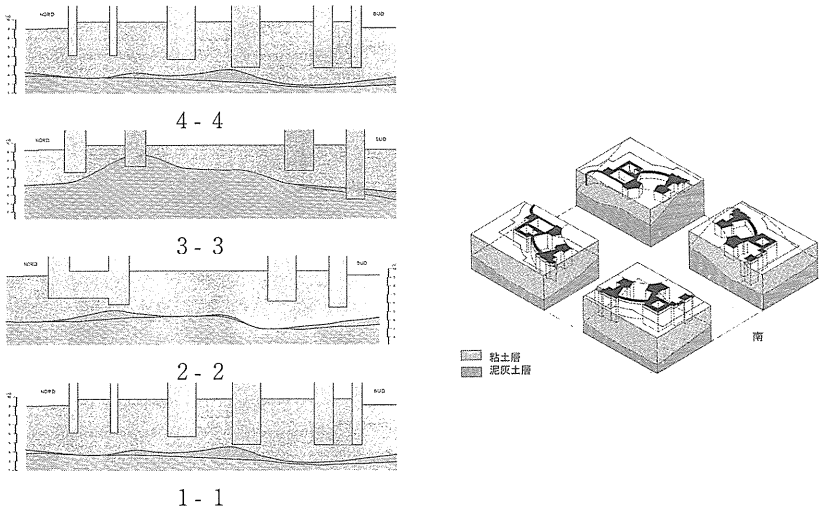


図12 泥灰土層の等高線の基礎の様子<sup>2)</sup>

1723-24年 アーチ枠を支える6本の組積造柱の建設

組積造の6本の柱にドーム架設用の $2 \times 2$  mピッチの木製の足場の作成が開始された(図15)。

1724-30年 足場建設の継続

1729年春 組積工事の再開

1730年 ドームの起拱点までドラムが完成

1730年秋 ドーム建設用の巨大な足場が完成

雨や雪除けのため、藁で覆われる。メインドームの建設用煉瓦を焼く窯の準備を開始。

1731年春 足場に修正や修繕の必要な箇所が見つかる

1731年6-10月 ドームの建設

1731年11月 ドームの仮の覆いを設置

1732年5月22日 ドームの足場組の解体

足場は絵画装飾のために1748年まで残された。メインドームは

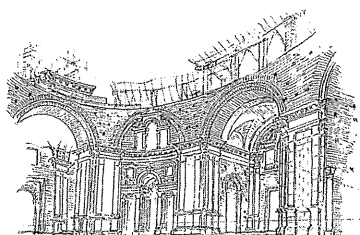
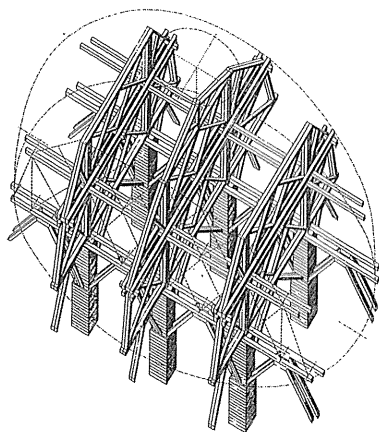


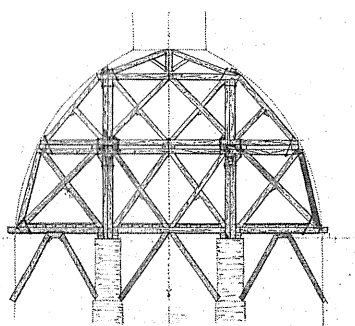
図13 Galloによるドラムの建設前の様子 (Archivio private, Torino)



図14 Gallo によるドームの建設前の様子 (Archivio private, Torino)



(a) アクソメ図



(b) 断面図

図15 ドーム建設用の足場<sup>14)</sup>

1732年の春に短期間で建設され、同時に控え壁が建設された。ドームを補強し、控え壁に荷重を流し、連続した巨大なフレスコ画の空間をメインドームの内側に作るために、ランタンの基部からドラム上方の壁の方まで伸びたリブが作られた (写真1 (h))。さらに、ドームの外周に3本の鉄製のリングを設置する工事に入った。これ



らのリングは、約 3 m の鉄の棒を楔で連結したものである。一番下のリングは、断面が $50 \times 50 \text{ mm}$ で、ドームの起拱点のすぐ外側に、他の 2 本は、いずれも断面が $40 \times 70 \text{ mm}$ で、丸窓の上に位置する。Gallo の行ったリング工事の位置を図 7 に、その継手部分の様子を図16に示す。

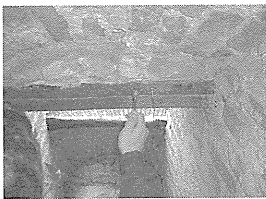
1732年秋 ランタンの工事とドームの煉瓦屋根工事の開始

1733年 9 月 ランタンの工事の完成

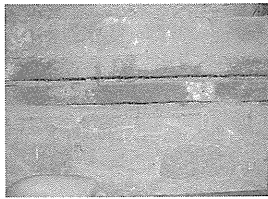
1733年10月 ドームの瓦の覆いとランタンの鉛の覆いが完成

ドームの屋根は経済的理由で予定していた鉛の覆いから変更

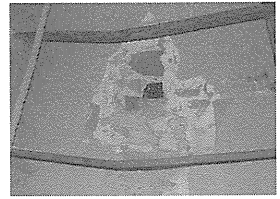
1750年 F. Gallo の死



(a) 1 番目



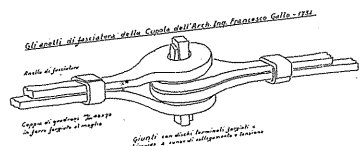
(b) 2 番目



(c) 3 番目



(d) 1 番目継手部分



(e) 継手詳細<sup>1)</sup>

図16 Gallo によるリング

### 3) その後

1735年にランタンが建設され、教会堂は1750年に完成したにもかかわらず、1917年まで教会堂の建設は続き、この年には新しい鐘楼の競技設計が行われた。

1800年代初頭 ドームにひび割れ発生

ドラムとドームのいくつかの亀裂は、下から見えるほどだった

1825年 建築家 *Bonsignore* が主要ファサードを設計、1829年に実施

1830年 技師 *Bordino* が教会堂の排水システムを改良

1832年 *Remondini* と *Panizza* による報告

1877年 *Jacod* と *San Quintino* による報告

1880年 2月8日 イタリアの国宝に指定される

1883年 ドームの瓦の覆いを銅の覆いに葺き替える

1890-94年 主要ファサードが完成

1904年 鐘楼の尖塔を取り壊す

1917年 新しい鐘楼のための競技設計を実施

## 2. 3 Garro によるヴィコフォルテ教会堂の調査

ヴィコフォルテ教会堂は、前節で述べたように、地盤選択の誤りによる不同沈下と大規模な楕円形ドームの自重のため、今日ではかなり広範囲にわたって多くのひび割れが観察される。教会堂のひび割れを含む劣化現況を把握するには、1750年の教会堂の完成から今日までの劣化の経過を知り、その都度どのような修復が行われてきたかを理解しておく必要がある。そこで本節では、1935-1962年の間に行われた技師 *Martino Garro* の調査結果を中心に、近年の修復工事以前までの劣化の進行を具体的に整理する<sup>1)</sup>。

*Garro* は、教会堂調査の任務期間中に、建物の変形やひび割れの詳細

な測定、基礎の沈下量の測定など、さまざまな仕事を行った。そのため、ドームとドラムの煉瓦壁に入ったひび割れの大きさを調べる多くの印をつけている。また、Gallo により設置されたドームの補強リングを探し、その状態も調査した。さらに Garro は、新たな補強リングを挿入する提案をしたが、ドームが危険な状態にあるにもかかわらず、計画は実行されなかった。

Garro による調査結果は、すべてが正しいというわけではないが、教会堂の構造を明らかにし、実測図を作成するなど、その資料価値は高い。

図17、図18は、教会堂の不同沈下量を表したものである。これより、西側入り口の北側柱には大きな沈下が発見された。この柱は、1600年の柱の台座建設時に、既に最初の沈下として220~270mm が確認されており、ドームが建設され始めると、沈下量は500~600mm と最大になった。

そして、基礎と同様に柱も不同沈下したために、アーチ上に引張力がかかるようになった。また、北側アプシスの西側の柱でも204mm もの大きな沈下が生じている。これは、アーチからドラムの楕円窓の右にまで達しているひび割れ幅30~40mm の深いひび割れと対応している。

図19は、Garro による1962年当時のひび割れ図である。図20は、Garro による特に規模の大きい西面のひび割れ図とその写真である。これは、ドームに現れたひび割れの中、最大の長さで、外弧側で13.10m、内弧側で21.20m に達しており、その幅は48mm にも及ぶ。

このひび割れは、ドームの自重により南北方向に生じた大きな引張力と、ドームを支持する西側2本の柱の不同沈下に起因していると考えられる。

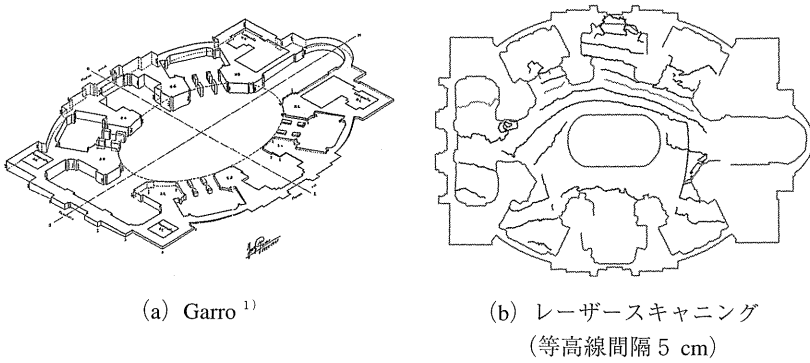


図17 不同沈下の様子

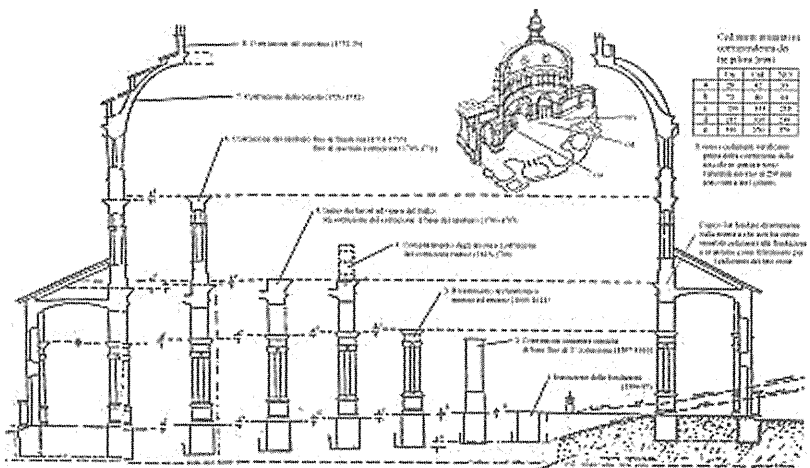
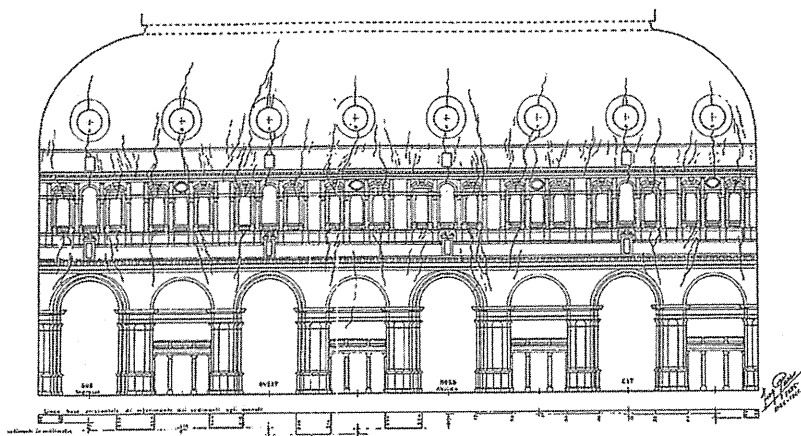
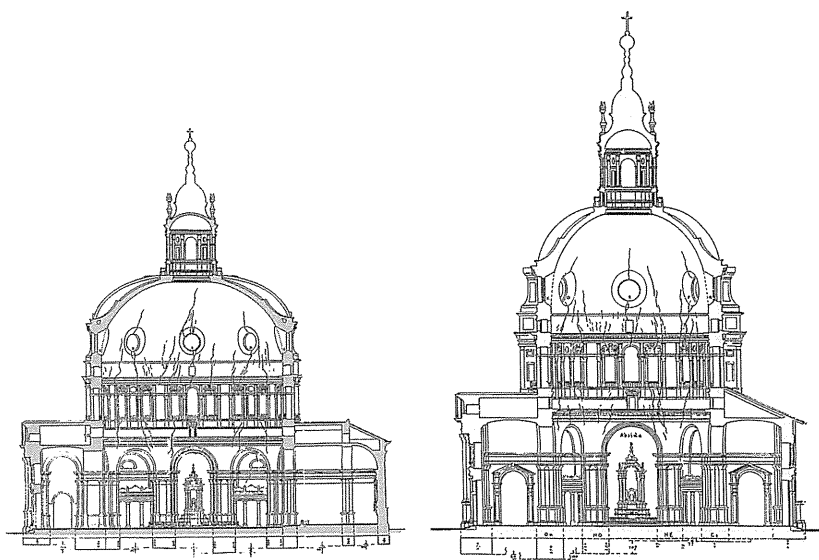


図18 建設過程と西側の沈下状況<sup>1)</sup>





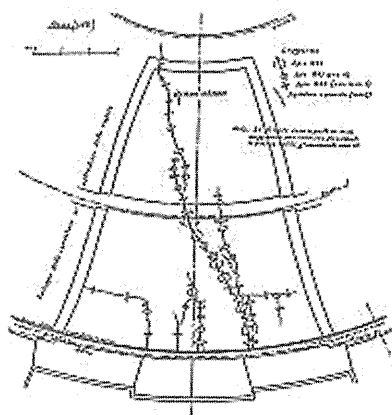
(a) ひび割れ展開図



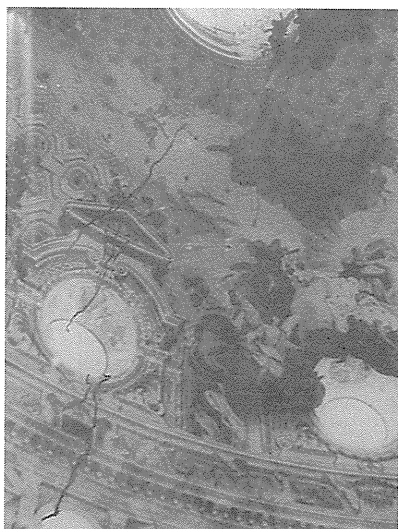
(b) 南北（長軸）方向

(c) 東西（短軸）方向

図19 ひび割れ図<sup>1)</sup>



(a) ドーム西外弧面ひび割れ図



(b) 西面のひび割れ状況

図20 ドーム西面のひび割れ

## 2. 4 ヴィコフォルテ教会堂の排水管システムの改良

教会堂の不同沈下を防ぐために、建設当初から排水管が設置され、その改良は、各時代で行われてきた。図21は、教会堂の各時代の排水システムを示したものである。ここでは、建設当初からの排水管システムの歴史を整理する。

Garro の調査にもあるように、建物の建設期間中の顕著な沈下時期は、1596～1610年と1614～1701年の2つの時期に大きく分けられる。

第1段階の1596～1610年の時期は、柱と壁の接合面とそれらに関わる箇所特に沈下が大きく、ひび割れが増大した。そこで、Vittozzi は、アーチの起拱点まで立ち上がった段階で工事を中断し、粘土層の排水をするための水路の設置工事を行った。この水路の利用によって、桶を使った排水除去の規模が縮小し、現場の労力が減った。

第2段階の1614～1701年には、現場監督が次々と交替したために、排水管の作動状態が観察されなかった。しかし、Gallo の時代に整備が行われたため、1701～1750年には、基礎の沈下の進行は十分に停止していた。

建設中に建物の状態を調査することは簡単ではなかったが、1750年の建設完了に伴って、ひび割れの実測が行われた。その結果、1750年の Gallo の死後すぐに、建物のひび割れの状況は悪化したことが分かっている。

1830年、技師 Virginio Bordino は、教会堂周りの大理石の床の周囲までの範囲を網羅する排水管を建設するように委任された。これにより排水は、Ermena 川に流されることとなった。新しい排水管のシステムは、基礎の状態を明らかに好転させた。しかし、この排水管は、大流量には対応できていなかったため、1883年には、教会堂の雨樋から流

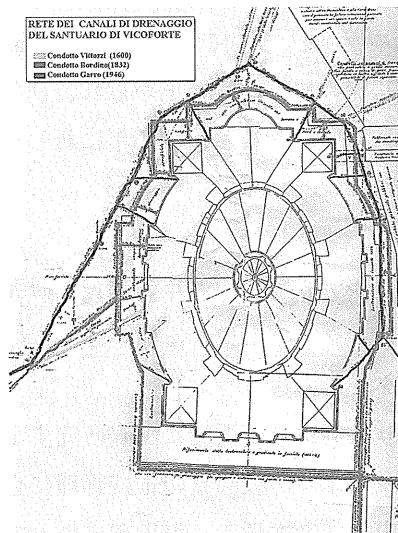


図21 各時代の排水管システム

れてくる雨水までもが排水管に流れていることが、大きな問題となった。雨水が別のダクトに運ばれるような対策が取られるようになった1908年までは、雨量の多い時には、排水管に水が浸透し、新たな基礎の沈下が生じていた。

1832年、Bordino の工事後の教会堂の状況を評価するために、技師 Remondini と Panizza によって工事の調査が行われた。これにより、基礎地盤の沈下によるドラム西側の大きなひび割れを問題視する報告がされている。

1877年の技師 Giuseppe Jacod と Felice S. Quintino の報告では、現在の安定した状態は、Bordino の功績であると報告している。彼らもまた、西側のひび割れに警告を発している。

Garro は、Bordino の排水ダクトの計画は、ダクトの継ぎ目に鋭角の部分や曲がった部分があるために、正しく水が流れ出ず、大量の水が溜まるというミスを指摘した。1946年には、さらに全長459mのダクトを既存の排水管ネットワークに付け加えた。Garro 自身が行ったモニタ監視の結果、基礎の沈下が食い止められ、ひび割れの進行が抑制されたことが示されている。なお、1946年に新しく作られたものも、Ermena 川に排水している。

## 2. 5 ヴィコフォルテ教会堂の近年の調査・研究と修復工事の歴史

1972－74年 鉄筋コンクリートによる傾いた屋根の修復

1973－76年 ランタンの修復

1975年 文化庁より教会堂を全面的に調査研究するための資金援助

1974年、ヴィコフォルテ教会堂の維持管理に必要な準備をするための団体が、歴史家、考古学者、美術家によって組織され、1975年には基礎の土質にとどまらず、建物全体を調べるための資金が集

まった。このような条件が整ったことで、以下の計画が着手されることとなった。

- 1) 基礎地盤の地質に関する調査
- 2) 幾何測量と写真測量などに基づく形状の調査
- 3) 建物全体の振動特性、地質の測量、ドームの組積造構造の測量
- 4) 解析と調査によるひび割れと変形を受けた状態と正常な状態の建物の挙動の解明

この計画に基づいて専門委員会が設立され、1975～1976年には、コンサルタント会社の Rodio と技師 Bernasconi 氏によって建物と地質の調査が行われた<sup>2)、15)</sup>。

1976年 基礎地盤と組積造に関する地質工学的調査研究

主要なひび割れには2つの変位計を、50箇所の小さなひび割れには温度計を組み合わせたものを設置

1976年 3月26日 写真測量<sup>16)</sup>

1976年11月 有限要素法による最初の解析モデル

1983年 別の10個の温度計と8つの変位計の設置

1984年 補強リングシステムの計画

補強リングの導入張力を計算するための有限要素法による第2解析モデルの作成。ドラムの組積造壁へのエポキシ樹脂の注入。ポリウレタンによるドーム西側ひび割れの修復。

1985年 補強のためドラムの組積造壁へ2度目の注入

1985-86年 補強リングの設置工事

1987年 4月 第1回目の補強リング緊張

1987年 7月 第2回目の補強リング緊張

1987年11月 第3回目の補強リング緊張

設計者により最適とされた緊張力の40%が導入

1986-88年 フレスコ画の修復

1986-87年 教会堂の基礎設備の修理

1986-87年 建築物の構造の大修復

1990-91年 アプシスと主要な柱廊玄関の修復

1992年 工事の検査

1993年 既存装置の改良の決定

1994年 別の15個の温度計を設置

データ収集自動化のための設備を設置

2002年- Vicoforte2002-2006プロジェクト

モニタリングと現状把握のためのイタリアー日本国際学術研究。

劣化現況調査、モニタリング、構造解析ほか<sup>17)-29)</sup>。

## 2. 5. 1 土質および地盤の調査

現存する地盤に対して、地質調査が14箇所、基礎の組積造面の位置を把握するための調査が29箇所で行われた。調査は、コアボーリングによって行われ、基本的に粘土と泥灰土の2種類である地盤から多数のサンプルを抜き取った。

この結果、教会堂の基礎は、北東の柱の基礎だけは泥灰土層の上に建っており、その他の北側、南側、西側の基礎は粘土層にあることが分かった(図11、図12)。この基礎面のバランスの悪さが、不同沈下を引き起こし、建物を劣化させたと結論付けられている。北西面は大きく沈下し、西側の丸窓と北側の大きなひび割れの原因となっている(写真1 (g)、図20)。

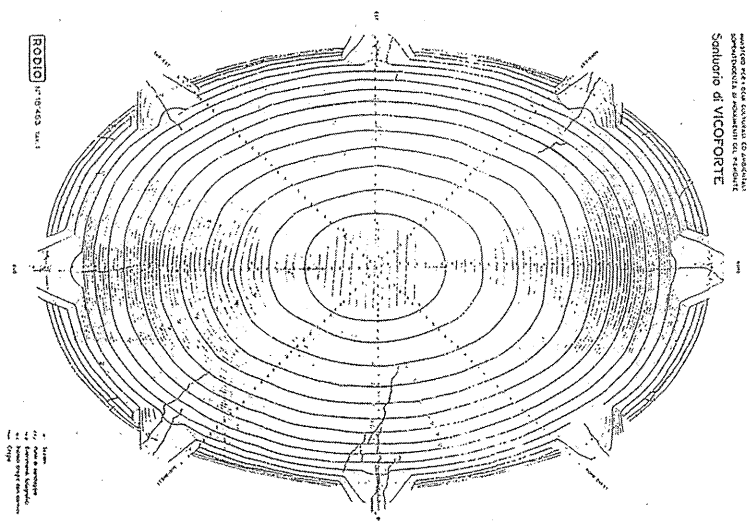
### 2. 5. 2 測量調査

1976年、教会堂の構造を調べるため、ドラム、ドームの内弧面、ランタンの内弧面を対象に写真測量が実施され、その結果は図化されている（図22）<sup>16)</sup>。その後、Vicoforte2002-2006プロジェクトの一環として、2003年により正確な測量が行われ（図2～図6）<sup>5)</sup>、2006年に三次元レーザースキャニングが実施されている（第4章）。

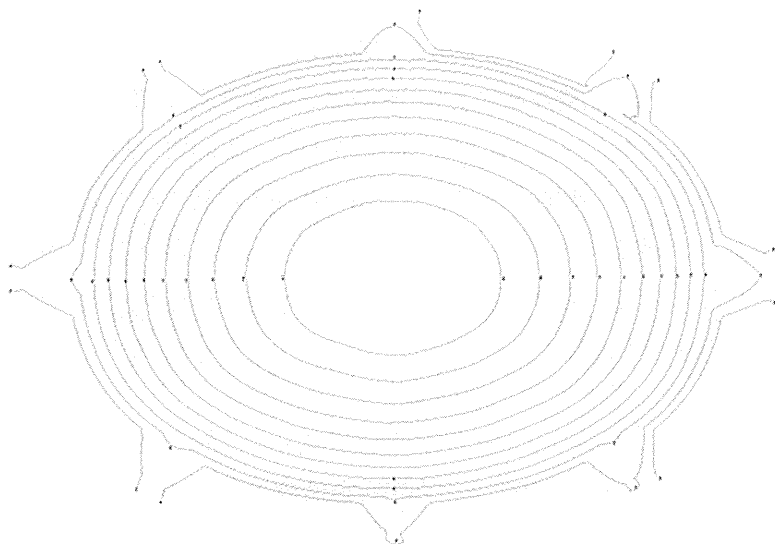
### 2. 5. 3 構造材料調査

ドームの補強、修復、および補強リングの設置に際しての構造計算に必要となる材料定数を決定するため、2種類の実験が行われた<sup>2)</sup>。ひとつの実験は、組積造の圧縮強度と変形の関係を明らかにするためのもので、2つの試料をドラム部分から、4つの試料をバットレス部分から採取して実験を行っている。実験はISO R 147に従い、変位は、変位計を2本使用してその平均を求めている。もうひとつは、弾性波（縦波と横波）の伝播速度により、壁の厚さを測定する実験である。壁の片側に鉄板を介してハンマーで打撃を与え、反対側で測定する方法が取られている。動的ポアソン比、動弾性係数、動せん断係数、動ねじれ係数の測定を行っている。以下は、ドームから採取された組積造のサンプルについての試験結果である。この数値は次節の構造解析に使用されている。

比重	$\gamma = 1.7 \text{ tf/m}^3$	弾性係数	$E = 140000 \text{ tf/m}^2$
ポアソン比	$\nu = 0.39$	線膨張係数	$\alpha = 0.00008$

(a) Rodio による結果<sup>16)</sup>

北



(b) 三次元レーザースキャニングによる結果

図22 メインドームの等高線 (20cm 間隔)



## 2. 5. 4 構造解析と補強リングの導入

### (1) 構造解析と補強リングの導入張力の決定

1976年、測量および材料試験の結果に基づき、有限要素法を用いて、ドームと床面から31.1m より上のドラム部分の構造解析が初めて行われた。解析には梁要素を用い、幾何測量と写真測量の結果に基づき、正確なモデルが作成された。

解析の結果、周方向の引張力は、丸窓の上にあるドームに帯状に分布していること、ドーム下の丸窓の間とひび割れの発生している辺りに局部的に現れることが分かった。また、その引張力の値は、 $7 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ であると推定している。上記の構造解析の結果を利用して補強リングを設置することとなり、そのための入念な計画が立てられた。その要点は、以下の4項目である。

- 1) ひび割れによって作られる隙間を結合するために、ドラム上部／ドーム基部に補強リングを設置する。
- 2) 楕円形建造物であるため、それぞれの区間で異なる荷重が支えられる円形リングの形態を考案する。
- 3) ひび割れの年間の膨張・収縮を吸収できるように、約20mmの膨張収縮機能を持つ補強リングの形態を考案する。
- 4) 教会堂やその内装を損なわないような、目立たないリングの設置方法を提案する。

構造解析に取り入れられた補強リングは、堅く緊結されたドラムの場合には、長軸から短軸に移動するに従って、応力が徐々に変化する。この解析から得られた張力の値に基づいて緊張力として採用された値は、これらの値の20%値である。

また、解析の結果、鉄のリングを嵌めることで、楕円形ドーム内に生じているひずみを吸収することの妥当性が明らかとなった。

## (2) 補強リングの設置

ドームを取り囲むリングは、腐食保護作用のためにエポキシ樹脂やタール混合物を含む70mmのシースで据え付けられた直径32mmのポストストレッチングバー4本1組で作られた14セグメント、計56本で構成されている。各セグメント同士が、鉄骨によって接続されることで、リングは連続した形になっている。

このような補強リングを楕円形ドラムの外周に設置すると、外観上、ドラムがリングによって上下に分断された形となってしまう。写真2は、このような問題を解決するために壁の中に作られたニッチである。PC鋼棒を取り付けるためのニッチを掘るにあたって、解体作業が行われた。この際、フレスコ画装飾の保護と鉄のリングを挿入する組積造壁の補強を目的として、1 m<sup>2</sup> 当たり4ヶ所の割合で、ドラムの壁厚の3/4までエポキシ樹脂を注入した。解体した外側部分の煉瓦は、ニッチを掘るために搬出され、建物の美観を損なわないように作られたニッチ自体を閉じるパネルを組み立てる際に再利用された。これらのパネルは、スチールフレームで作られ、平行移動と回転を可能にする蝶番で組み立てられている。このようにして、国宝の美的保護の観点からも、補強装置が目につかないという効果を挙げている。

それぞれのセグメントにおいて、PC鋼棒の一端にはジャッキが、もう一方には60tfの容量の荷重計が設置された。PC鋼棒の張力は、1987年4月、7月、11月の3段階で、初期の値から緩められ、緊張力の最大値の約40%となった。設計者は、この最適な値が常に得られると考えていた。しかし、補強リング内の応力変化は、鉄と組積造の線膨張係数が異なること、温度変化に伴う応力損失などによって、年平均気温時におけるリングの鋼棒56本の平均応力緩和の最大値は、設置後4年間で57kNから48kNへと約20%も減少した。補強リングの張力の経

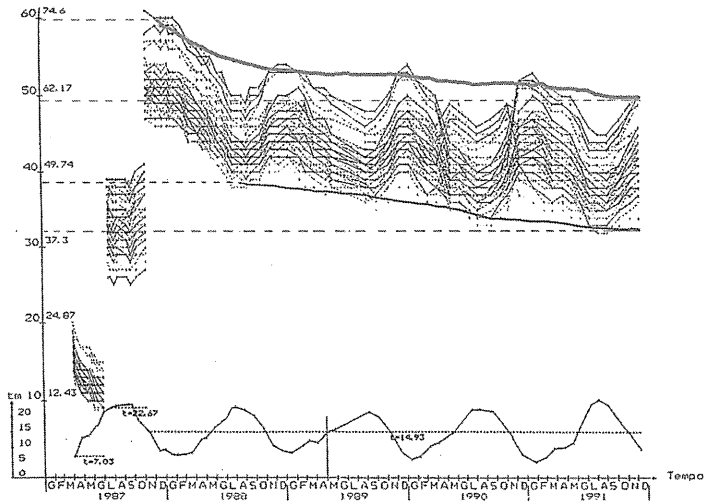


図23 補強リングの応力の経年変化

年変化を図23に示す。

## 2. 5. 5 モニタリング調査

1976年には、より大きなひび割れに対応できるような精密な装置が、堂内に設置された。大きなひび割れに対しては、垂直に設置された2つのトランスデューサが、小さいひび割れに対しては、50の変位計が用いられた。トランスデューサと変位計は、顕著な動きやその測定位置に対応する温度を連続して記録できるものである。このモニタリング作業により、1976年からは、温度とひび割れの時間変化をグラフで整理できるようになった。モニタリングの結果から、建物の変形は、一日の温度変化と一年の温度変化に起因していることが分かり、ドームの変形は進行中のものではなく、温度変化に対応したものであることが分かった。

さらに、1983年に制御システムを強化するための事業が行われ、西

側を中心にドームの外弧面とドラムの主なひび割れ7つに対し、10個の温度計、8個の変位計が追加され、グラフを記録するデータレコードが接続された。

1976-1987年の間に据え付けられた装置は、構造物の連続的なモニタリングはできないことから、1993年に以下の装置類の改良を行うことになった。

- 1) 温度変化に伴う引張力の変化の推定精度を上げるため、補強リング近くの組積造壁に、15個の温度計を設置する。
- 2) 丸窓のヴォールトの下の特異な西面ひび割れに対応して、新しい変位計を設置する。

さらに、災害である地震、洪水などからもこの国宝を保存するために、教会堂の全面的なモニタリングシステムを作る計画がVicoforte2002-2006プロジェクトとして進行中で、強震計の設置を除き、既に温湿度、変位のモニタリングが再開されている。

### 3 飛行船格納庫

#### 3. 1 飛行船格納庫の建設経緯

飛行船格納庫は、Pastandrea と Costa dei Conti 地区の間、メガレーゼ港 (Megarese) にそびえる海拔32m の丘に建設され、フェデレコ二世 (Federeco II) により建設されたアウグスタ島の東側のシュワーベン城 (Castello Svevo) のちょうど反対に位置している。現地では、アクロポリスの丘に建つパルテンノン神殿に例えられており、12,000m<sup>3</sup>の飛行船を収納することができる格納庫は、ヨーロッパで、いや恐らく世界中で現存する鉄筋コンクリートで作られた唯一の例である (写真4、図24～図27)。



(a) 正面の鉄製大扉



(b) 側面



(c) 天井通路と屋根



(d) 屋根を支える構造

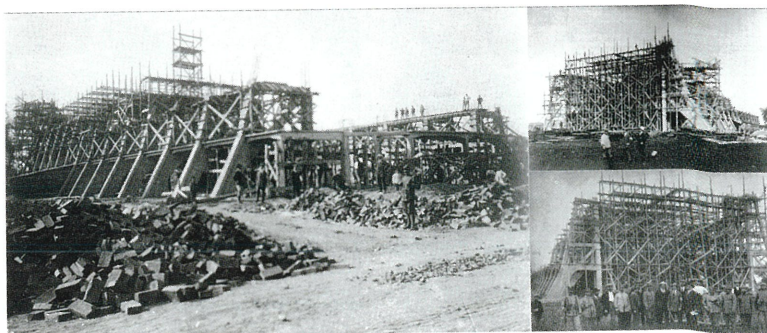


(e) 東面のクラック

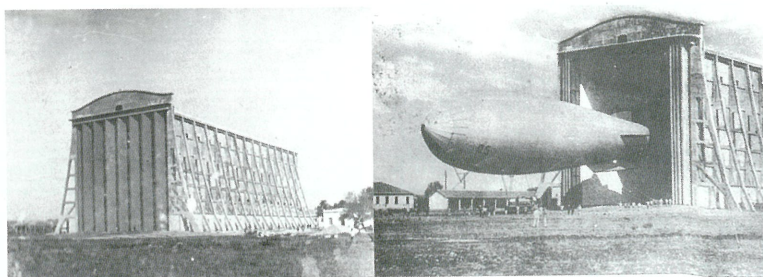


(f) ワイヤのアンカー状況

写真4 飛行船格納庫

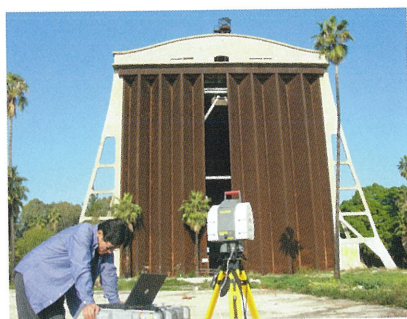


(a) 建設途中 (1918年)



(b) 完成 (1920年)

写真5 当時の様子<sup>30)</sup>



(a) 地上レベル



(b) キャットウォークレベル

写真6 三次元レーザースキャニング状況

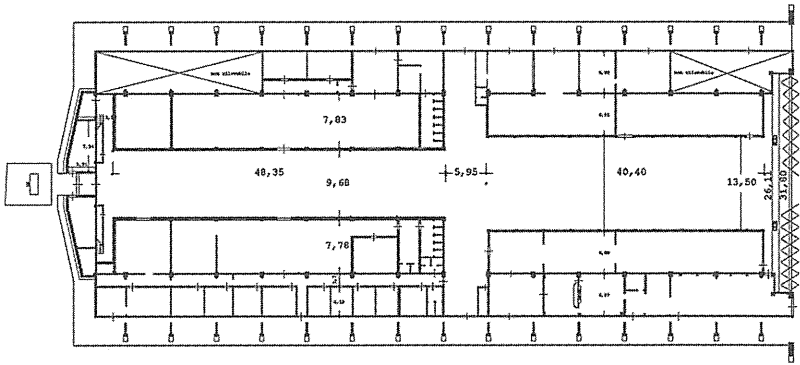


図24 飛行船格納庫平面図（単位：m）<sup>31)</sup>

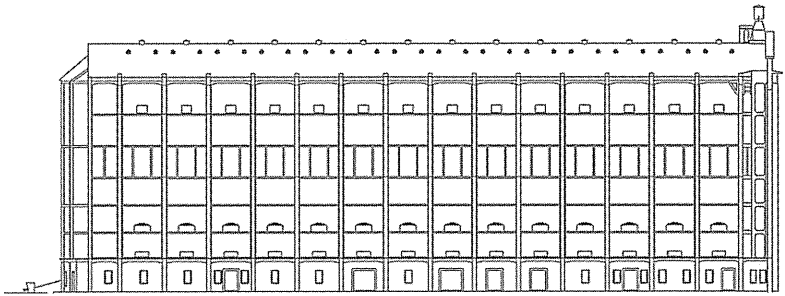


図25 飛行船格納庫立面図<sup>31)</sup>

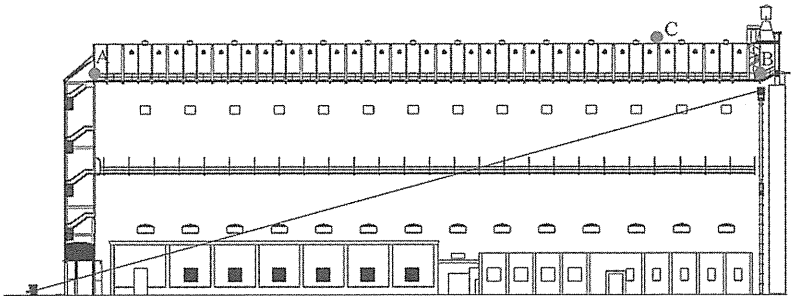
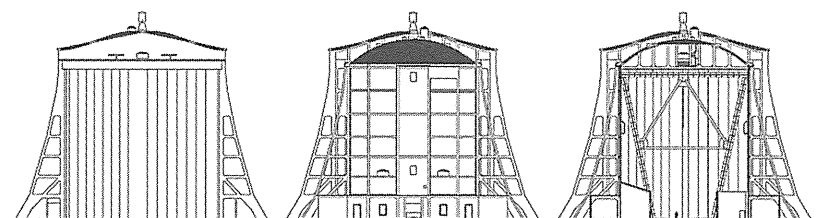


図26 飛行船格納庫断面図<sup>31)</sup>





(a) 南側立面図

(b) 北側立面図

(c) 断面図

図27 飛行船格納庫断面図<sup>31)</sup>

格納庫は、1987年12月24日に国宝に指定されたものの、頻繁なフーリガン行動によって被害を受けて、非常に傷みが進んでいる。また、鉄製の大扉による不同沈下などの影響で、壁面には大きなひび割れが生じ、その構造的安定性が危惧されている。さらに現在、人々の無知と無関心のために、世界で唯一の鉄筋コンクリート飛行船格納庫を失う危険性に直面している。以上を背景として、飛行船格納庫のサーモグラフィー法による外壁のひび割れ調査、鉄筋間隔および鉄筋の腐食度の調査、中性化深さおよび塩化物イオン量の測定、常時微動測定とひび割れおよび建物の傾斜のモニタリングを開始している<sup>32)</sup>。

### 3. 2 飛行船格納庫<sup>33)</sup>

飛行船格納庫の構造は、16本の鉄筋コンクリートバットレスと、水平方向の繋ぎ梁、および鉄筋コンクリートの壁で構成されている。その規模は、外形長さ105.50m、幅45.20m、高さ37.00mで、内法は長さ100.00m、幅26.00m、高さ31.00mである（図24～図27）。強力な電気エンジンによって開閉が制御された高さ31m、14枚からなる折り畳み式の鉄製大扉が前面にあるが、もし今日正常に動くとしたら非常に興味深かったと思われる。格納庫の領域は、風の方向であるNNW-SSE方向に、作戦行動を行う500m×400mのスペースを含んでいる。



飛行船格納庫は、第一次世界大戦中、ドイツの潜水艦 U ボートからの絶え間ない攻撃に対して、飛行船による航空防衛を南イタリアに提供するために建設された。格納庫の建設は1917年に始まり、当初は非常に短期間で建設を終える予定だった。しかし、実際に建設が完了した時には、戦争は既に終わっていた。したがって、すべての戦略上の努力である格納庫の建設が無用であるかのように思われたが、1920年代には、格納庫、兵舎、炊事場、貯蔵庫、洗濯場、診療所と、指揮官と担当官のための若干の家から成り立つ軍のエリアが開かれた。

アウグスタの上を飛んだ最初の飛行船は、中央イタリア空軍基地から移されていた5,000m<sup>3</sup>(150m の高さにおいて巡航速度50km/h) の O.S. タイプであった。数年後、飛行船で北極点の上を飛んだことで知られているエンジニア、ノビレ (Nobile) は、新しいタイプの7,000m<sup>3</sup>の N 2 タイプの飛行船を設計して作った。

1925年 8 月29日、イタリアのヴィットリオ・エマヌエーレ国王 (Re Vittorio Emanuele) は、格納庫を訪問した。後に、港航空防衛を強化することを目指し、水上飛行機ステーションおよびクレーン、第二次世界大戦水上飛行機魚雷と水上飛行機偵察のための作業所が完成した。降り立つ水上エリアは、要塞「Garcia e Vittoria」の近くであり、長さ1,200m であった。第二次世界大戦時、アウグスタは非常に厳しい空中戦と海戦が見られた。数回爆弾を投下された町は、重い被害をこうむっている。幸いなことに、偶然と思われるが、アヴァロスタワー (Torre Avalos)、要塞「Garcia e Vittoria」、シュワーベン城、格納庫のような軍の建物と下の水上飛行機ステーションは損なわれないままであった。

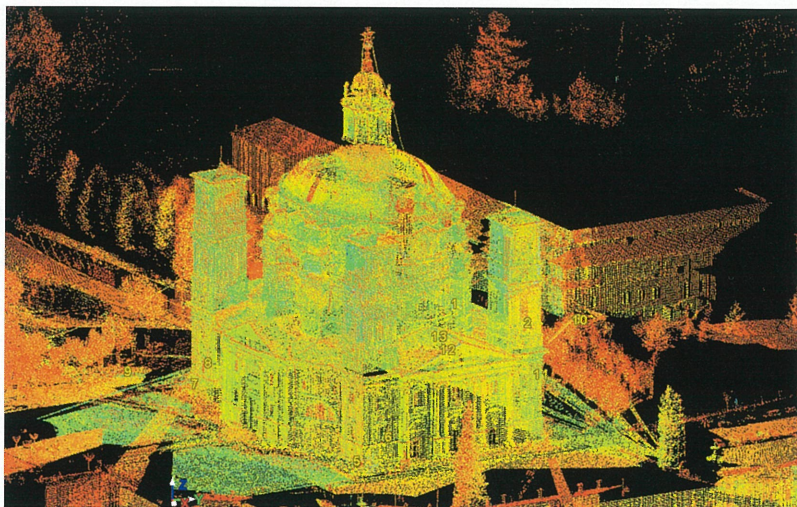
戦争の後1958年まで、イギリスの会社 BOAC が、イギリスーイタリアー北アフリカの間で、水上飛行機ステーションを商業的に用いてい

た。何年もの間、水上飛行機は商品と乗客を運びながら メガレーゼ港に降り立った。その後長期間に渡って、格納庫はイタリア財界の警察ヘリコプターのための基地になった。

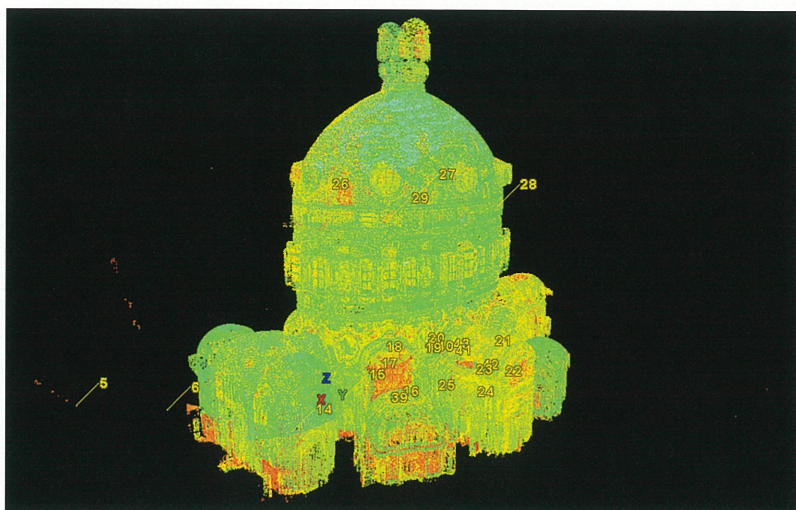
1987年12月24日、シチリア地域政府は条例2739によって、格納庫を大いに興味深い歴史的モニュメントであると宣言した。1989年4月25日、飛行船／気球時代と格納庫についての「Housing the Airship」博覧会が開催されたロンドンにおいて、同様のことが言及された。しかし、これを最後に、完全に忘れ去られてしまった格納庫は、頻繁なフリーガン行動によって被害を受けることになり、非常に傷んでいった。

#### 4 三次元レーザースキャニング計測

ヴィコフォルテ教会堂と RC 飛行船格納庫のその後の研究の出発点となるような資料価値の高い図面を作成するために、三次元レーザースキャニングを実施した。ヴィコフォルテ教会堂については、①特にドーム、ドラム、バットレス、ピアの変形、および不同沈下の状況を明らかにするとともに、②イタリア側が実施した教会堂一階床面のレベル測量、長軸および短軸に関する教会堂、ドーム断面の測量結果とデータの統合、③コーニスのレベルおよび傾斜の状況、クラックの状況、④施工上の特徴、ならびに、⑤既になされた修復・補強工事の評価などを体系的に行い、また、⑥非破壊検査（電磁波レーダと衝撃弾性波）により推定されたメインドームとドラムの厚さの検証を行うことが可能となる。さらに、ヴィコフォルテ教会堂と RC 飛行船格納庫で実施しているモニタリングデータと三次元レーザースキャニングデータを統合することが可能となる。三次元レーザースキャニングには、ライカ HDS3000を用いた。測定状況を、写真3と写真6にそれぞれ

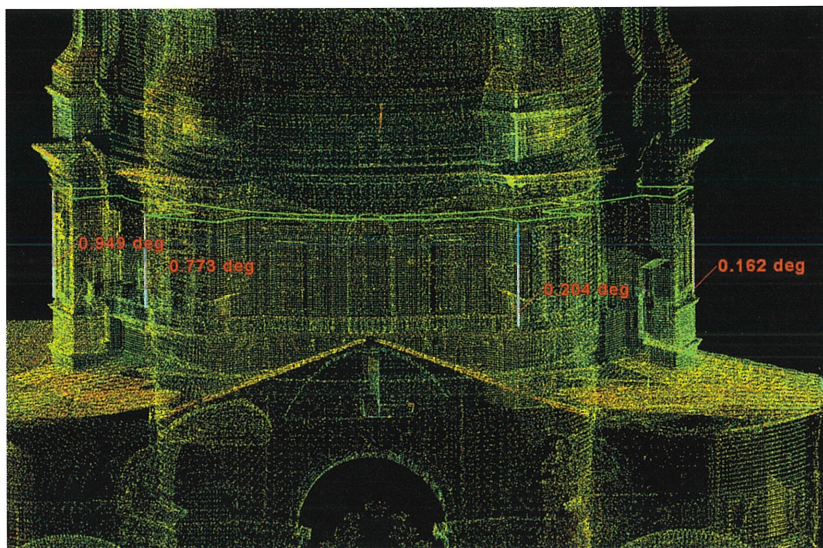


(a) 外部（南西側より）

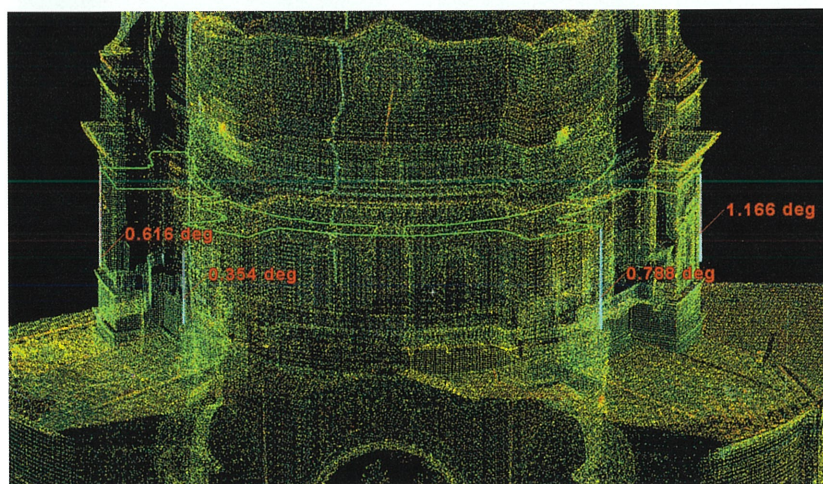


(b) 内部（南東側より）

図28 ヴィコフォルテ教会堂



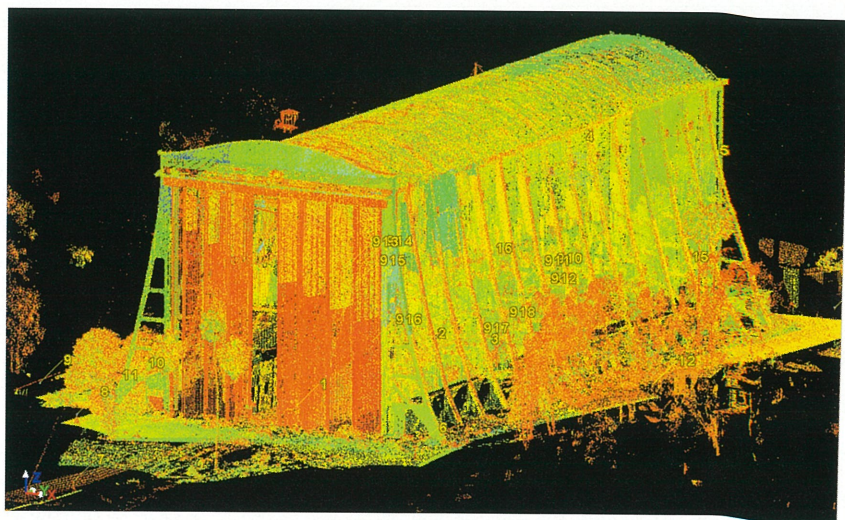
(a) バットレスの傾き (南面)



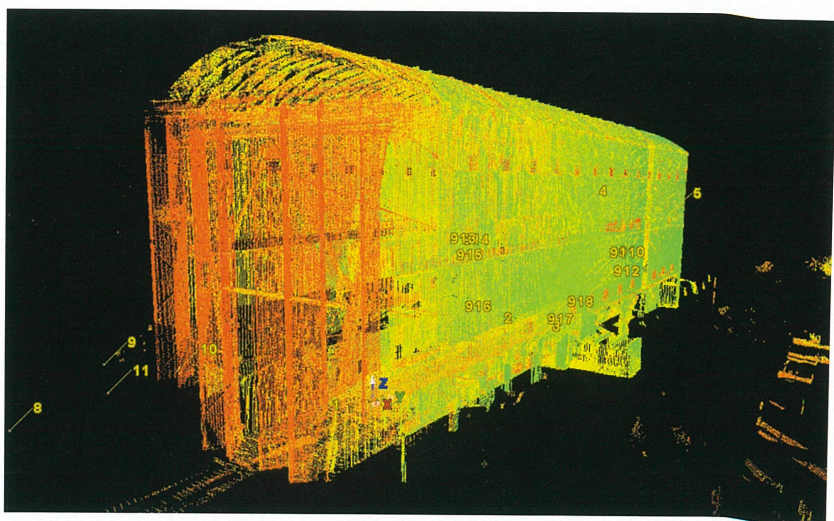
(b) バットレスの傾き (北面)

図29 ヴィコフォルテ教会堂のバットレスの傾き





(a) 外部（南東側より）



(b) 内部（南東側より）

図30 RC 飛行船格納庫

れ示す。

スキニング結果である点群データを図28から図30に示す。ヴィコフォルテ教会堂の点群数は約1億点、RC飛行船格納庫の測定点数は約4千万点である。

ヴィコフォルテ教会堂については、床面の等高線データ（図17）、メインドームの等高線データ（図22）、バットレスピアの傾きデータ（図29）などの準備ができつつあるので、今後は過去の調査結果などとの比較検討を行う予定である。

RC飛行船格納庫については、フェラーラ大学のグループが、2003年に2億8千万点の計測を行っている<sup>34)</sup>。両者のデータを比較することにより、2～3年間の変形状況を把握することができるかどうか検討中である。

## 5 まとめ

本稿では、日本では殆ど知られていない、イタリアにおける歴史的な組積造建築であるヴィコフォルテ教会堂（18世紀建設、世界最大規模の組積造楕円形ドーム：1880年に国宝指定）と、RC飛行船格納庫（1917年建設開始、1987年に国宝指定）の建設経緯、修復工事の歴史を整理するとともに、三次元レーザースキニング調査の概要を報告した。両者の劣化現況調査、モニタリング、構造解析結果については、稿を改めたい。

## 謝辞

ヴィコフォルテ教会堂とRC飛行船格納庫の調査の実施にあたって

は、Vicoforte 教会堂宗教局および管理局の方々、Augusta 市、トリノ工科大学の M.A. Chiorino 博士、D. Sabia 博士、名城大学谷川恭雄博士、東京大学中埜良昭博士、高橋典之博士、日本大学湯浅昇博士、大阪大学阪上隆英博士、独立行政法人建築研究所濱崎仁博士、(株)コンステック込山貴仁博士、佐藤大輔氏、カタールニア大学 A. Ragusa 博士、V. Leggio 氏など、多くの方々の協力を得ました。また、(株)ジオファイブの小原勝次氏、(株)開発調査研究所の山田岳史氏、ライカジオシステムズ株式会社の村上利則氏には、三次元レーザースキャニング計測で便宜をはかっていただきました。また、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（A）海外学術調査）の助成を受けて実施されたものである。ここに厚く御礼申し上げます。

## 引用・参考文献

- 1) M. Garro, “Santuario - Basilica Regina Montis Regalis, Vicoforte - Mondovì, Opere di Consolidamento e Restauro”, Relazione Riassuntiva, Vicoforte di Mondovì, 1962
- 2) Rodio SpA, “Santuario di Vicoforte, Prove di Laboratorio su Campioni di Muratura, Misure Geofisiche”, Relazione n.19' 797, 1983
- 3) G. Pizzetti, G. Fea, “Restoration and Strengthening of the Elliptical Dome of Vicoforte Sanctuary”, Proc. of IASS-MSU International Symposium on DOMES from Antiquity to the Present, Istanbul, 1988, pp.289-308
- 4) M.A. Chiorino, G. Fea, G. Losana, “Strengthening and Control of the Dome of Vicoforte Sanctuary”, Proc. of IABSE International Symposium on Structural Preservation of Architectural Heritage, Rome, 1993, pp.723-724
- 5) G. Garneo, “Rilievo Celerimetrico”, 2003
- 6) G. Vacchetta, “Nuova Storia Artistica del Santuario della Madonna di Mondovì a Vico”, Biblioteca della Società per gli Studi Storici, Archeologici ed Artistici della Prov. di Cuneo, N.20, 1984, pp.61-89, p.102

- 7) L. Melano Rossi, “Il Tempio della Pace in Val d’Ermena (presso Mondovì), Milano, 1914
- 8) L. Firpo, “Theatrum Sabaudiae (Teatro degli Stati dei Duchi di Savoia), Archivio Storico della Città di Torino, Torino 1985, Vol.II, tav. 38-40
- 9) L’amministrazione del Santuario, “La Madonna Santissima del Mondovì a Vico, Santuario Basilica Regina Montis Regalis”, Stilgraf, Vicoforte, 1990
- 10) SAC. G. Conterno, “Maria Santissima del Montereale”, Edizioni del Santuario, 1993
- 11) L. Barosso, “La Struttura Tamburo-Cupola del Santuario di Vicoforte : Materiali e Tecniche Costruttive”, Società degli Ingegneri ed Architetti in Torino, 1979
- 12) A. Cecca, “Analisi Strutturale della Cupola Ellissoidica del Santuario di Vicoforte”, Tesi di Laurea in Architettura Anno Accademico 1993-1994, Io Facoltà di Architettura, Politecnico di Torino, 1994
- 13) A. Spadafora, “Analisi Strutturale del Santuario di Vicoforte con il Metodo degli Elementi Finiti”, Tesi di Laurea in Architettura Anno Accademico 2001-2002, Io Facoltà di Architettura, Politecnico di Torino, 2002
- 14) G. Zander, “Su Alcuni Disegni di Francesco Gallo per le Armature della Cupola del Santuario di Vicoforte”, 1981
- 15) S. C. Marchini, “Santuario di Vicoforte, Indagini Geognostiche e Prove Geotecniche di Laboratorio”, Ministero per i beni Culturali ed Ambientali, Soprintendenza ai Monumenti del Piemonte, 1979
- 16) Rodio SpA, “Santuario di Vicoforte, Rilievo Fotogrammetrico”, 1976
- 17) 込山貴仁, 青木孝義, 大橋幾世, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案 (その1: 非破壊検査技術を用いた劣化・構造調査), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), A-1, 2002.8, pp.3-4
- 18) 大橋幾世, 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 畑中重光, 濱崎仁, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案 (その2: 目視と非破壊検査技術を用いた劣化



- 現況調査), 日本建築学会東海支部研究報告集, No.41, 2003.2, pp.137-140
- 19) 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂の劣化現況に関する非破壊検査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, 2003.7, pp.1613-1618
  - 20) 込山貴仁, 青木孝義, 湯浅昇, 畑中重光, 濱崎仁, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案 (その3: 材料強度の推定法に関する研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), A-1 (材料施工), 2003.9, pp.153-154
  - 21) 青木孝義, 込山貴仁, 濱崎仁: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案 (その4: 常時微動測定に基づく振動特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), A-1 (材料施工), 2003.9, pp.155-156
  - 22) 青木孝義, 湯浅昇, 濱崎仁: イタリア Vicoforte 教会堂 (レンガ造) における非破壊検査試験の適用 (その1 衝撃弾性波法の適用), 日本非破壊検査協会, 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会, No.009-236, 2004.3, pp.5-10
  - 23) 湯浅昇, 青木孝義, 濱崎仁: イタリア Vicoforte 教会堂 (レンガ造) における非破壊検査試験の適用 (その2 材料強度・耐久性試験), 日本非破壊検査協会, 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会, No.009-237, 2004.3, pp.11-14
  - 24) 大橋幾世: 非破壊検査法による歴史的建築物の劣化現況調査方法に関する研究ーヴィコフォルテ教会堂の調査を通してー, 平成14年度名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻修士論文, 2003
  - 25) T. Aoki, M.A. Chiorino, R. Roccati : Structural Characteristics of the Elliptical Masonry Dome of the Sanctuary of Vicoforte, Proc. of First International Congress on Construction History, Madrid, 20-24 January 2003, Vol.1, 2003.1, pp.203-212
  - 26) T. Aoki, M.A. Chiorino, R. Roccati, A. Spadafora, "Structural Analysis with F.E. Method of the Elliptical Dome of the Sanctuary of Vicoforte" , Proc. of

- First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration IMTCR04, Lecce, 6 - 9 June, 2004, pp.417-429
- 27) T. Aoki, T. Komiyama, Y. Tanigawa, S. Hatanaka, N. Yuasa, H. Hamasaki, M. A. Chiorino, R. Roccati, "Non-destructive Testing of the Sanctuary of Vicoforte", Proc. of 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, July 4-7, Vol.4, 2004.7, pp.1109-1118
- 28) 濱崎仁, 湯浅昇, 青木孝義: イタリアヴィコフォルテ教会堂への非破壊・微破壊試験の適用, シンポジウム コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集 (Vol.2), 日本非破壊検査協会, 2006.8, pp.173-178
- 29) M. A. Chiorino, R. Roccati, C. D'Addato, T. Aoki, C. Calderini, A. Spadafora, "Monitoring and Modeling Strategies for the World's Largest Elliptical Dome at Vicoforte", Proc. of the V International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India, November 6-8, 2006.11, pp.1167-1176
- 30) T. Marcon, "Quarant'anni due idroscali - Augusta, Siracusa e l'aviazione", Ediprint, Siracusa, 1992
- 31) カターニア大学建築学部 of Vincenzo Leggio 氏の提供による
- 32) 青木孝義, 濱崎仁, 込山貴仁, 湯浅昇, 谷川恭雄: アウグスタの飛行船格納庫の劣化現況調査, 日本建築学会技術報告集, 第23号, 2006.6, pp.53-58
- 33) T. Marcon, "L'Hangar per Dirigibili di Augusta", pp.1-4
- 34) F. Ferrari, A. Greco, F. Uccelli, "L'hangar per dirigibili di Augusta", Paesaggio urbano, lug.-ago., 2003, pp.XX-XXIII